

Загальні питання технологій збагачення

УДК 622.7

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Харків, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"),

П.В. СЕРГЄВ, д-р техн. наук

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕЛЕКТИВНОЇ МАСЛЯНОЇ АГРЕГАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

Постановка проблеми. Селективна масляна агрегація вугілля поєднує сукупність процесів структурування тонкої полідисперсної вугільної фази у водному середовищі за допомогою масляних реагентів. В основі процесів селективної масляної агрегації вугілля лежить механізм адгезійної взаємодії олеофільної вугільної поверхні з маслами, в результаті якого досягається її селективне змочування і агрегування в турбулентному потоці води. Гідрофільні часточки, не змочувані маслом в склад агрегатів не входять, що дозволяє виділяти їх у вигляді породної суспензії [1].

В залежності від режимних параметрів, технологічної схеми, досягаемого результату, зокрема, виду продукту агрегації доцільно виділити масляну грануляцію (МГ), агломерацію (МА) та флокуляцію (МФ). При грануляції та агломерації в процес втягуються зерна вугілля до 3-5 мм, а при флокуляції – не більше 0,1-0,2 мм. Гранулят являє собою моно- або полідисперсний сипучий продукт, складений з сферичних і овальних гранул крупністю від 0,5-0,7 мм до 7-10 мм. Агломерат – це частково згранульоване полідисперсне вугілля представлене вуглемасляними комплексами крупністю від 0,2-0,3 мм до 1,1-1,3 d_{\max} (d_{\max} – максимальний діаметр вугільного зерна). Флокули – пухкі або ущільнені вуглезв'язуючі комплекси крупністю не більше 0,2-0,3 мм. Питомі витрати масла-зв'язуючого взяті на 1000 $\text{cm}^2/\text{г}$ зовнішньої поверхні вугілля ($S_{\text{пит.}}$) при грануляції складають 8...12 мас.% від сухої маси вугілля, при агломерації – 2...3 мас. %, флокуляції – 0,2...0,5 мас.%. Абсолютні значення витрат масла сильно залежать від параметра $S_{\text{пит.}}$ та в'язкості зв'язуючого і коливаються в таких межах: для грануляту – 8...10 – 40÷50 мас.%; агломерату – 2...7 мас.%; флокуляту – 0,5...2 мас.%.

Обширні лабораторні дослідження, стендові та промислові випробування, експлуатація на вуглезбагачувальних фабриках підтверджують такі основні технічні можливості процесів СА вугілля маслом:

I. збагачення тонкодисперсного вугілля ($\leq 0,1...0,2$ мм) зольністю до 60-70% при концентрації суспензії від 400-500 до 50-70 г/л з одержанням концентрату стабільної зольності в межах 5-20% і відходів зольністю 75-85% та більше;

II. знесірчування вугілля за рахунок видалення піритної сірки на 70-80%;

III. зневоднення вугілля до вологості 7-15%;

IV. облагороджування вугільної маси, яке полягає в "консервації" вугілля в агрегатах, що різко зменшує окиснення, розмокання, набухання вугілля підвищує його стійкість до механічних впливів, практично ліквідує пилоутворення.

Альтернативи методу масляної селекції при збагаченні ультратонкого вугілля (дрібніше 30-50 мкм) практично немає. Перспективним вважають застосування технології МГ і МА для гідротранспортуемого вугілля. На основі вуглемасляного агломерату можливе одержання нового виду палива – гранульованого вугілля та мазуто-вугільних суспензій для ТЕС і котелень, а також сировини для коксування. Все це стимулює дослідження з галузі МГ-МА. Селективна масляна агломерація знайшла промислове застосування при переробці відходів дрібних класів бітумінозного вугілля на двох підприємствах північного сходу США. Все це свідчить про перспективність СА вугілля маслами [2-8].

Сьогодні для дослідження і оптимізації процесу селективної масляної агломерації вугілля часто використовуються різні методи моделювання і оптимізації процесів масляної агрегації коксівного вугілля, зокрема програма SolidWorks, Statgraphics та ін. [9-12].

Мета роботи – одержання шляхом математичного моделювання сімейства статистичних моделей процесу масляної агломерації вугілля.

Виклад основного матеріалу. Методом ротатабельного центрально-композиційного планування експерименту одержані такі трифакторні моделі для визначення діаметру гранул (агломератів), що формуються за коалесцентним механізмом:

$$d_a = f(Q_m, \tau_a, n_b); \quad (1)$$

$$d_a = f(Q_m, \tau_a, t_c); \quad (2)$$

$$d_a = f(Q_m, \rho_{bc}, \tau_a); \quad (3)$$

$$d_a = f(\rho_{bc}, n_b, t_c); \quad (4)$$

$$d_{max} = f(Q_m, \tau_a, n_b). \quad (5)$$

Експериментальна область факторного простору: витрати масла зв'язуючого $Q_m = 18-27$ мас.%; зв'язуюче – композиція брикетину і реагенту ААР-1 в масовій пропорції 1:4; густина водо-вугільної гідросуміші $\rho_{bc} = 100-200$ л; температура гідросуміші $t_c = 13-37^\circ\text{C}$; тривалість перемішування пульпи (пелетування вугільно-масляних агрегатів) $\tau_a = 3-13$ хв. вибрана виходя-

Загальні питання технологій збагачення

чи з технологічних особливостей вугілля та зв'язуючого, апіорної інформації по кінетиці процесу та з урахуванням результатів попередніх пробних дослідів.

Вихідне вугілля – марки Г шахти ім.Бажанова, ВО "Макіїввугілля", зольність $A_v^d = 10,9$, крупність 0-200 мкм. Межі зміни параметрів ρ_{bc} та t_c включають характеристики ряду пульп вуглезбагачувальних фабрик та фугатів в системах магістральних гідротранспортних систем. Досліди рандомізувалися. Довірча імовірність отриманих результатів $p=0,95$.

Значення коефіцієнтів поліномів (1)-(5) наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти поліномів					
Коефіцієнти	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5
A_0	1,223	1,097	1,195	1,202	1,839
A_1	1,150	1,289	1,222	-0,534	1,632
A_2	0,407	0,430	-0,039	0,507	0,341
A_3	0,249	0,025	0,551	-0,027	0,318
$A_{1,1}$	0,512	0,611	0,518	0,496	0,767
$A_{2,2}$	-0,001*	0,275	0,146	0,726	0,289
$A_{3,3}$	0,070,	-0,025	0,164	0,231	0,271
$A_{1,2}$	0,263	0,250	-0,113	0,275	0,088
$A_{1,3}$	0,538	0,000*	0,588	0,200	0,913
$A_{2,3}$	0,188	-0,125	-0,538	0,325	-0,163
Дисперсія адекватності	0,09	0,09	0,08	0,06	0,14
Постійні параметри	$\rho_{bc}=100\text{г/л}$ $t_c=18^\circ\text{C}$	$\rho_{bc}=100\text{г/л}$ $n_b=2250\text{хв}^{-1}$	$t_c=32^\circ\text{C}$ $n_b=2250\text{хв}^{-1}$	$Q_m=25\%$ $\tau_a=11\text{ хв}$	$\rho_{bc}=100\text{г/л}$ $t_c=32^\circ\text{C}$
* – незначимі коефіцієнти					

Багатофакторність процесу та висока чутливість об'єкту по каналах x_i - d_a , z_j - d_a не дозволила одержати 4-х факторну модель. Тому спочатку в моделях (1), (2) та (3) визначені найменш значимі параметри – ними виявилися відповідно густина пульпи ρ_{bc} , швидкість обертання імелера мішалки-агітатора n_b та температура середовища t_c . Далі серед цих параметрів за допомогою моделі (4) визначено найменш значимий параметр – t_c . таким чином, виділено дві моделі – (1) та (3), які включають порівняно найбільш значимі параметри – Q_m , τ_a , n_b , ρ_{bc} . Аналіз цих моделей показує збіжність одержуваних результатів з полігонними та промисловими дослідженнями.

Простежимо одержання однієї з виділених моделей, що включає найбільш значимі параметри, а саме (1): $d_a = f(Q_m, \tau_a, n_b)$ і проаналізуємо її.

Таблиця 2.

Матриця планування та результати експериментів.

X1	X2	X3	D ₃	D _p
-1	-1	-1	0,9	0,890223
1	-1	-1	1,5	1,648
-1	1	-1	0,8	0,813647
1	1	-1	2,6	2,82142
-1	-1	1	0,3	0,154116
1	-1	1	2,8	2,86189
-1	1	1	0,7	0,62754
1	1	1	4,5	4,58532
-1,68179	0	0	0,6	0,763944
1,68179	0	0	5	4,72923
0	-1,68179	0	0,5	0,504172
0	1,68179	0	2	1,889
0	0	-1,68179	1,1	0,914456
0	0	1,68179	1,7	1,77872
0	0	0	1,1	1,15305
0	0	0	1,2	1,15305
0	0	0	1,1	1,15305
0	0	0	1,1	1,15305
0	0	0	1,2	1,15305
0	0	0	1,2	1,15305

Одержаний поліном для функції відгуку – середнього діаметра вугільно-масляних агломератів D з урахуванням значущості коефіцієнтів моделі має вигляд:

$$d = 1,15305 + 1,17889 \cdot X_1 + 0,411712 \cdot X_2 + 0,256946 \cdot X_3 + 0,5634 \cdot X_1^2 + 0,3125 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,4875 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,1375 \cdot X_2 \cdot X_3$$

Коефіцієнти моделі наведено в нормованому вигляді. Модель адекватна процесу, що досліджується. Про це свідчить високе значення коефіцієнта детермінації ($R^2=99,0736\%$) і низьке значення стандартної похибки експерименту $\text{Standard Error of Est.} = 0,166454$.

На парето-графіку (рис. 1) показано характер і ступінь впливу факторів та ефектів їх взаємодій на діаметр вугільно-масляних агломератів d_a .

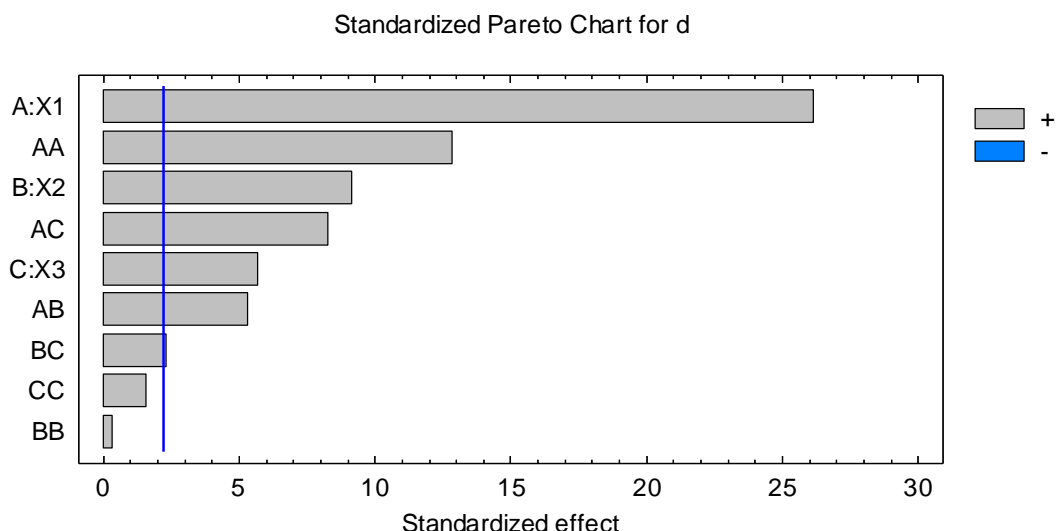


Рис. 1. Стандартизований парето-графік, який показує значимість коефіцієнтів при членах рівняння регресії

Найбільше впливають на діаметр гранул витрати зв'язуючого X_1 , другим за значимістю фактор – тривалість агітації X_2 . Фактор X_3 – швидкість обертання імелера мішалки-агітатора менше впливає на функцію відгуку. Збільшення факторів X_1 , X_2 та X_3 , приводить до збільшення діаметра гранул.

На рис. 2 зображений графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції. Як бачимо, в більшості випадків різниця між цими даними невелика. Більшість експериментальних точок знаходиться поблизу прямої лінії.

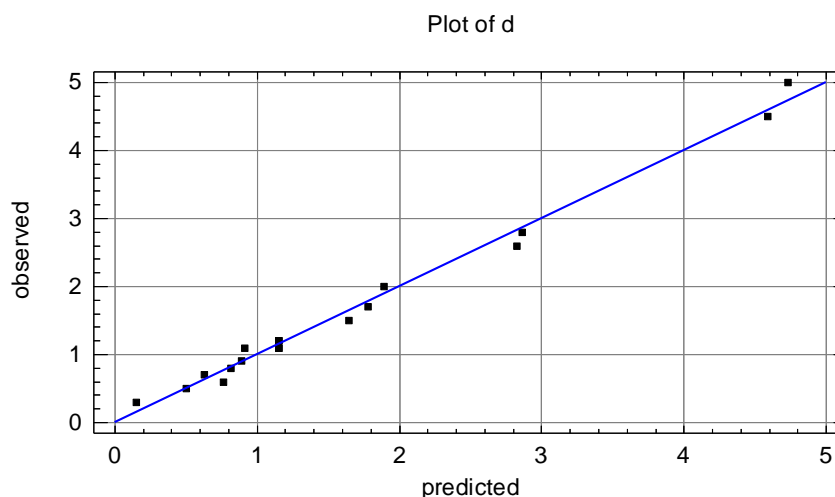


Рис. 2. Графік порівняння експериментальних (observed) і розрахункових (predicted) значень цільової функції

На рис. 3. подані часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $D(X_1, X_2)$ і $D(X_2, X_3)$, $D(X_1, X_3)$.

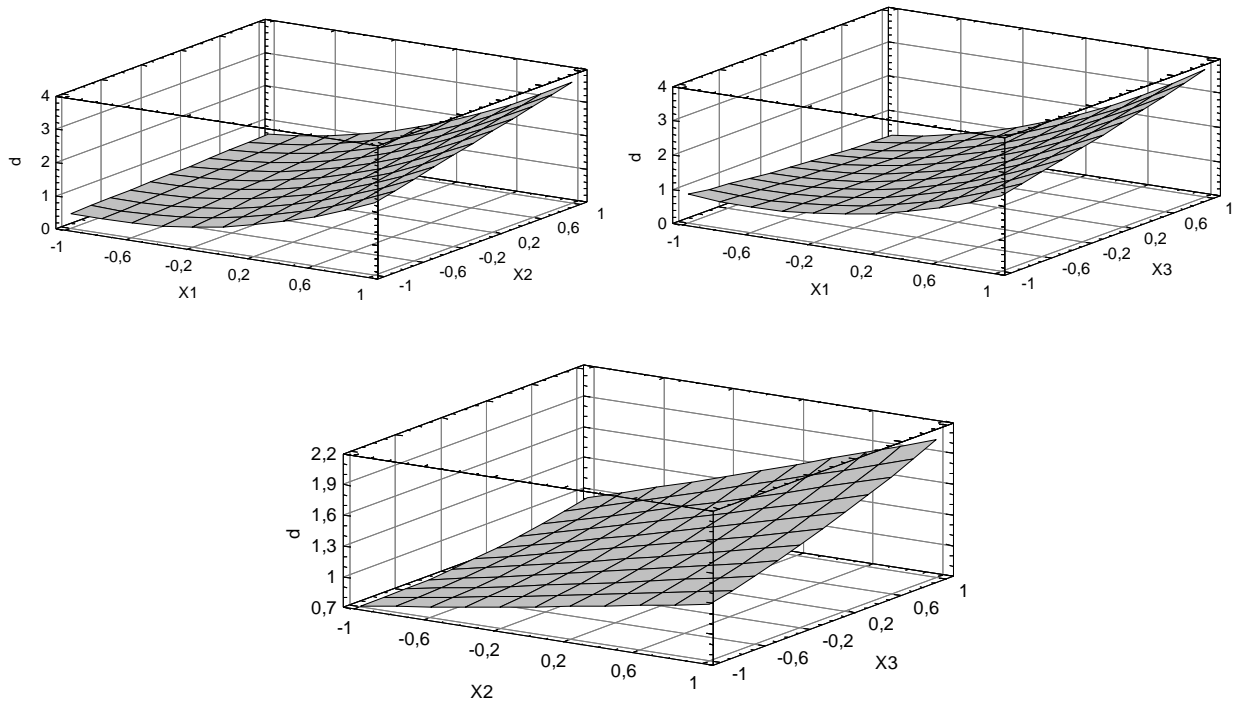


Рис. 3. Часткові тривимірні перетини гіперповерхні цільової функції $D(X_1, X_2)$ і $D(X_2, X_3)$, $D(X_1, X_3)$

На рис. 4 наведені контурні криві цих гіперповерхонь. Простежується чітке збільшення діаметра D вуглемасляних агрегатів (гранул) з ростом витрат зв'язуючого в області $Q_{зв} = 18-27$ мас.%, а також тривалості пелетування $\tau_a = 3-13$ хв. При збільшенні $Q_{зв}$ і τ_a середній діаметр D збільшується з 0,5-0,7 до 3,0-4,0 мм.

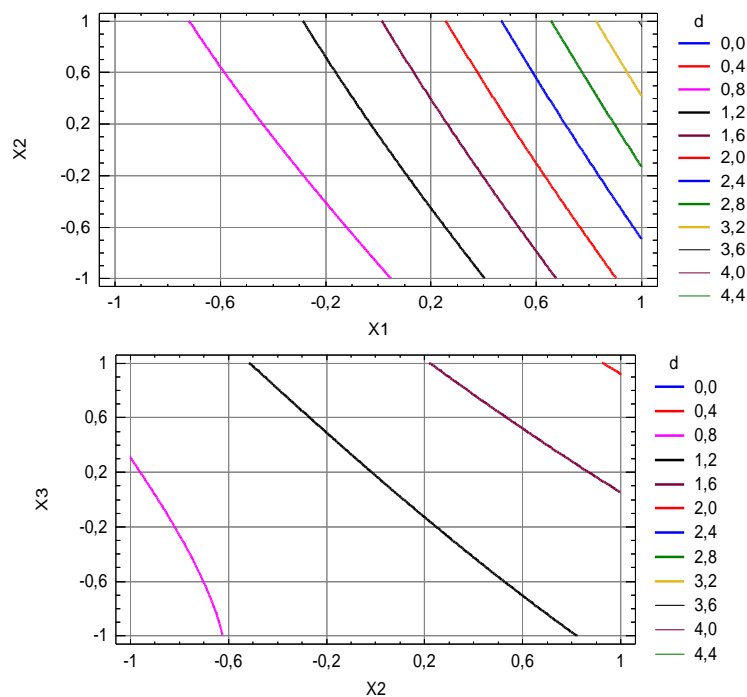


Рис. 4. Контурні криві гіперповерхонь, наведених на рис. 3

Контурні криві гіперповерхонь не показують наявності екстремумів поверхонь $D(X_1, X_2)$, $D(X_1, X_3)$, $D(X_2, X_3)$ в досліджуваних межах факторного простору. Результати оптимізації показують, що максимальна крупність гранул складає $D = 3,5-4,0$ мм. Режимні параметри, які забезпечують досягнення такого результату у перерахування на натуральні значення факторів: $Q_{зв} = 27$ мас.%, $\tau_a = 13$ хв., $\rho_{вс} = 200$ г/л; $t_c = 32$ °C, $n = 2250$ хв⁻¹.

Висновки

1. За результатами дослідів встановлено, що в процесі масляної агломерації вугілля марки Г вплив досліджуваних факторів на діаметр гранул за значимістю має таку послідовність: витрати зв'язуючого, тривалість агітації пульпи, швидкість обертання вала імпелера мішалки-агітатора. Результати оптимізації показують, що максимальна крупність гранул складає $D = 3,5-4,0$ мм.

2. Одержані математичні моделі процесу масляної агломерації вугілля марки Г можуть бути використані для поглибленого дослідження впливу на процес обраних факторів, а також визначення режимних параметрів що забезпечують максимальну крупність гранул.

Список літератури

1. Білецький В. С. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля / В. С. Білецький, П. В. Сергєєв, Ю. Л. Папушин. – Донецьк : Грань, 1996. – 264 с.
2. Харада Т., Мацуо Т. Агломерація у рідинах // Ніхон Когьо Кайсі. – 1982. – № 1134. – С. 714-722.
3. Черемонов В.М. Исследование и разработка комплексной технологии обогащения и глубокого обезвоживания угольных шламов с добавкой вязких органических продуктов. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – М., 1973. – 25 с.
4. Елишевич А.Т., Папушин Ю.Л., Белецкий В.С. Обогащение угольных шламов методом масляной агломерации // Кокс и химия. – 1991. – № 5. – С. 7-9.
5. Курбатов В.П. Научно-технические направления повышения эффективности обогащения и использования коксующихся углей. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. – Люберцы: ИОТТ, 1984. – 46 с.
6. Білецький В.С. Коксівні властивості вуглемасляних агломератів // Угле-химический журнал. – 2003. – № 3/4. – С. 3-7.
7. Brown N.A., Rigbi G.R., Callcott T.G. Coking behavior of coal recovery from slurry pipelines using a selective agglomeration technique // Fuel Process Technol. – 1980. – 3, №2. – P. 101-104.
8. Самилін В.М., Білецький В.С. Спеціальні методи збагачення корисних копалин: Курс лекцій. – Донецьк: Сх. вид. дім, 2003. – 115 с.
9. J.Spoelstra. The modelling of oil agglomeration of coal fines // Journal of Computational and Applied Mathematics. Volume 28, December 1989, Pages 359-366. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(89\)90347-6](https://doi.org/10.1016/0377-0427(89)90347-6).
10. G.H.V.C.Chary, M.G.Dastidar. Optimization of experimental conditions for recovery of coking coal fines by oil agglomeration technique // Fuel Volume 89, Issue 9, September 2010, Pages 2317-2322. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.016>.
11. Nevzat Aslan, İ. Ünal. Multi-response optimization of oil agglomeration with multiple performance characteristics. June 2011. Fuel Processing Technology 92(6):1157-1163. DOI

10.1016/j.fuproc.2010.05.029.

12. G.H.V.C. Chary. M.G. Dastidar. Optimization of experimental conditions for recovery of coking coal fines by oil agglomeration technique. // Fuel. September 2010. 89(9):2317-2322. DOI 10.1016/j.fuel.2009.12.016.

© Білецький В.С., Сергєєв П.В., 2018

*Надійшла до редколегії 12.02.2018 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*

УДК 691 (075.8)

В.П. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук

Е.В. ТАРАНИНА

(Україна, Мариуполь, Государственное ВУЗ "Приазовский государственный технический университет),

В.Ф. ГАНКЕВИЧ, канд. техн. наук

(Україна, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

ПОЛУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ ПЕРЕРАБОТКОЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Актуальность темы, рассматриваемой в данной работе, заключается в решении проблемы переработки техногенных отходов металлургического производства – шлаков и порождаемой энергетическим кризисом проблемы тепло-сбережения путем использования в гражданском и промышленном строительстве дешевых теплоизоляционных материалов.

К основным направлениям переработки металлургических шлаков наряду с производством вяжущих, заполнителей и бетонов на их основе относится и получение материалов из шлаковых расплавов – шлаковой ваты, которая является разновидностью минеральной ваты и обладает высокими строительно-техническими показателями.

Сырьевой базой для производства шлаковой минеральной ваты являются шлаки как черной, так и цветной металлургии, а также природные материалы: базальты, диабаз, гранит и др. горные породы.

Характеристика и технологический процесс получения минеральной (шлаковой) ваты

Минеральная вата состоит из искусственных минеральных волокон. Производство ее включает две основные технологические операции – получение расплава и превращение его в волокно диаметром 2...10 мкм. Расплав получают, как правило, в шахтных плавильных печах-вагранках [1]. Превращение расплава в минеральное волокно производят дутьевым или центробежным способом. При дутьевом способе выходящий из печи расплав разбивается струей